

São as reacções de fusão que fornecem a sua energia ao sol e às estrelas. Núcleos leves combinam-se, ou fundem-se, para formar núcleos com massa superior. O processo de fusão transforma uma parte (m) da massa total em energia cinética (E) segundo a lei de Einstein $E=mc^2$. No sol, uma série de reacções de fusão, a cadeia p-p, começa por uma reacção entre protões (núcleos do átomo de hidrogénio), para terminar com a produção de partículas alfa (núcleos de hélio). A cadeia p-p fornece a maior parte da energia solar, e continuará a fazê-lo durante milhões de anos.

A Fusão

Física de uma fonte de energia fundamental

FONTES E CONVERSÃO DE ENERGIA

VISTA DE CONJUNTO DOS PROCESSOS DE CONVERSÃO

A energia existe sob numerosas formas e são diversos os processos que permitem passar de uma para outra. Embora a energia total se conserve, a maior parte destas transformações reduzem a fracção de energia utilizável.



Parâmetros físicos de reacções exotérmicas

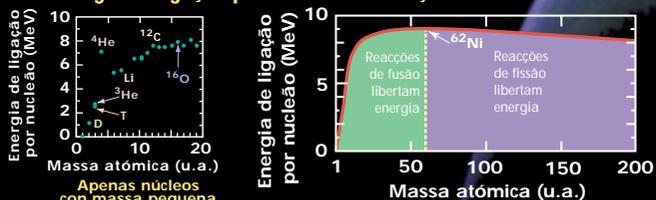
Tipo de reacção:	química	fissão	fusão
Exemplo	$C + O_2 \Rightarrow CO_2$	$^1_0n + ^{235}_{92}U \Rightarrow ^{143}_{56}Ba + ^{91}_{36}Kr + 2^1_0n$	$D (^2H) + T (^3H) \Rightarrow ^4He + ^1_0n$
Matérias primas (da central)	Carvão e Ar	UO_2 (3% ^{235}U + 97% ^{238}U)	Deutério e Lítio
Temperatura típica (K)	1000	1000	100 000 000
Energia libertada por kg de combustível (J/kg)	$3,3 \times 10^7$	$2,1 \times 10^{12}$	$3,4 \times 10^{14}$

COMO FUNCIONAM AS REACÇÕES DE FUSÃO

FÍSICA NUCLEAR DA FUSÃO

A fusão de elementos com massa pequena liberta energia, tal como a fissão de elementos com massa grande.

Energia de ligação por nucleão em função da massa nuclear



Energia da reacção nuclear: $\Delta E = k (m_i - m_f) c^2$

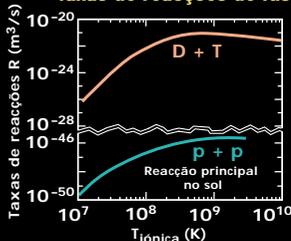
A partir da fórmula de Einstein, $E = mc^2$. ΔE = energia libertada por reacção; m_i = massa inicial (total) dos reagentes; m_f = massa final (total) dos produtos. O factor de conversão k vale 1 em unidades do S.I., ou $931,466 \text{ MeV}/(\text{u.a.})c^2$, se E for expresso em MeV e a massa m em unidades atómicas (u.a.).

Massas nucleares

(A massa do electrão é de 0.000549 u.a.)

Símbolo	Partícula	Massa (u.a.)
n (1_0n)	Neutrão	1,008665
p (1_1H)	Protão	1,007276
D (2_1H)	Deutério	2,013553
T (3_1H)	Tritão	3,015500
3He	Hélio-3	3,014932
4He	Hélio-4	4,001506

Taxas de reacções de fusão

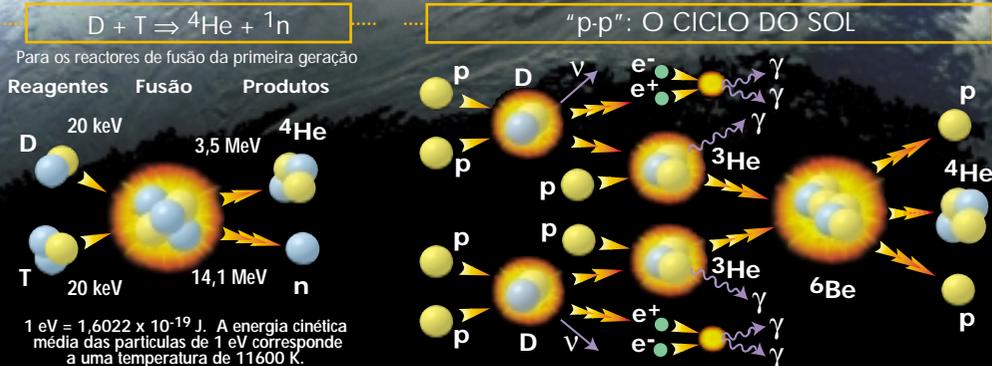


* 1 u.a. = $1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931,466 \text{ MeV}/c^2$

Número de reacções por unidades de volume e de tempo = $R n_1 n_2$

n_1, n_2 = densidades dos reagentes (iões/ m^3); R = taxa de reacções (m^3/s). A multiplicar por ΔE para obter a densidade de potência libertada.

DUAS REACÇÕES DE FUSÃO IMPORTANTES



OBTENÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FUSÃO

AQUECIMENTO E CONFINAMENTO DO PLASMA

Confinamento:

Para libertar uma energia considerável, a fusão requiere plasmas com temperatura elevada, confinados com densidade elevada durante um tempo suficientemente longo.

Valores típicos:

Gravidade: Dimensões: 10^{19} m
Tempo de vida do plasma: $10^{15} - 10^{18} \text{ s}$

- Compressão
- Energia dos produtos de fusão

Mecanismos de Aquecimento:

- Ondas electromagnéticas (electricidade)
- Injeção de neutros (feixes de hidrogénio atómico)
- Compressão
- Energia dos produtos de fusão

Gravidade



Campos magnéticos



Dimensões: 10 m
Tempo de vida do plasma: $10^{-2} - 10^6 \text{ s}$

Inércia



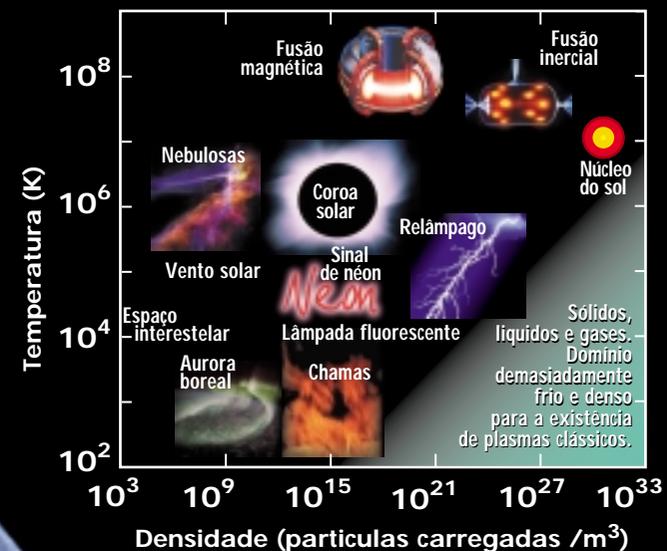
Dimensões: 10^{-1} m
Tempo de vida do plasma: $10^{-9} - 10^{-7} \text{ s}$

Para realizar a fusão na Terra, é preciso levar os átomos até temperaturas muito altas, superiores a 10 milhões de graus. A estas temperaturas, os átomos estão ionizados e formam um plasma. Obter-se-á uma produção líquida de energia quando o plasma estiver confinado durante um tempo que garanta a realização de um número suficiente de reacções de fusão. Se for possível construir reactores de fusão, existirá uma fonte de energia praticamente inesgotável, atendendo à abundância dos combustíveis, tal como o deutério. Têm vindo a ser obtidos progressos substanciais nesta via.

O PLASMA QUARTO ESTADO DA MATÉRIA

CARACTERÍSTICAS DE PLASMAS REPRESENTATIVOS

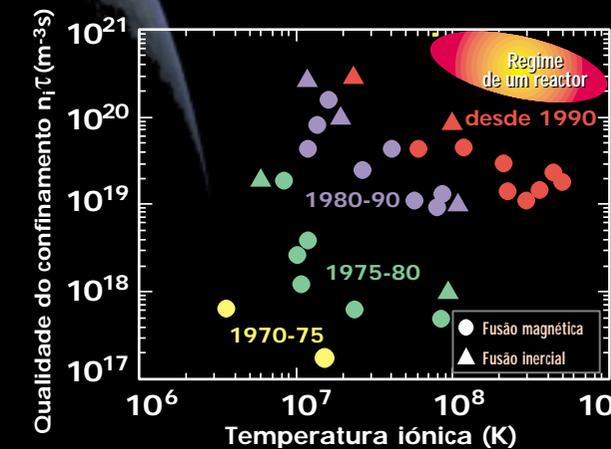
Os plasmas são constituídos por partículas carregadas, electrões e iões, que se movem livremente. Formam-se a temperaturas muito altas, quando os electrões se separam dos átomos aos quais estavam ligados. Os plasmas estão muito distribuídos no universo: são eles que formam as estrelas. Os plasmas são por vezes designadas por "Quarto estado da matéria" devido às suas propriedades distintas das dos sólidos, líquidos e gases. Os plasmas cobrem domínios de densidade e de temperatura extremamente vastos.



REALIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FUSÃO

RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA INVESTIGAÇÃO EM FUSÃO

Quer na via da fusão inercial quer na do confinamento magnético, os esforços têm-se concentrado na compreensão dos mecanismos de confinamento e aquecimento. Os progressos destas investigações traduzem-se no aumento constante dos valores atingidos para a temperatura T_i dos iões, para a densidade iónica n_i e para o tempo de confinamento da energia τ . Futuros reactores de fusão deverão produzir uma potência de cerca de 1 GW, com plasmas de $n_i \tau = 2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$ à temperatura iónica de $T_i = 120$ milhões K.



Copyright © 1996 Contemporary Physics Education Project (CPEP). Translation by IST Lisboa and Forschungszentrum Jülich / TEC

O CPEP é uma organização sem fins lucrativos, de professores, físicos e educadores, com uma participação importante do meio estudantil. Contribuíram para este projecto, de uma forma importante, particulares e sociedades, bem como laboratórios nacionais, cujo apoio continua ainda a ser crucial para o seu progresso futuro. Este cartaz foi feito pelo CPEP, com o apoio e participação dos seguintes organismos: a revista *Physics of Plasmas* da AIP, Division of Plasma Physics da APS, General Atomics, Lawrence Livermore National Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Princeton Plasma Physics Laboratory, University of Rochester Laboratory for Laser Energetics, U.S. Department of Energy, Trilateral Euregio Cluster e IST Lisboa. Fontes das ilustrações: NASA, o National Solar Observatory, Steve Albers e os organismos acima mencionados.